

$f_{\text{рез}} \approx 1,51$  ГГц. Значения  $\mu''$  существенно выше нулевых во всем диапазоне измерений (0,3-10 ГГц). В тоже время  $\mu'$  в области частот порядка 0,3-3 ГГц испытывает значительное уменьшение. Максимальная величина  $\mu''$  совпадает с частотой резкого изменения  $\mu'$ .

Результаты исследования частотных зависимостей комплексной магнитной проницаемости выявили прекрасные высокочастотные свойства функциональных тонкопленочных покрытий с частотами естественного ферромагнитного резонанса в пределах 0,7 – 2,75 ГГц, характерных для всех исследуемых образцов. Таким образом, использование магнитных композиционных пленок в качестве распределенного резистивного слоя, является перспективным в создании широкополосных радиопоглощающих структур на основе частотно-избирательных решеток.

*Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-42-363011 p\_мол\_a*

1. O. S. Tarasova, Yu. E. Kalinin, A. V. Sitnikov, and L. I. Yanchenko, Physics, Technologies and Innovation (PTI-2017) AIP Conf. Proc. Vol. 1886, P.020051-1–020051-4.

## **КВАНТОВЫЙ ПЕРЕДАТЧИК СИГНАЛА, СКОНСТРУИРОВАННЫЙ НА ОСНОВЕ АТОМОВ ПЕРЕХОДНОГО МЕТАЛЛА**

Кашин И.В.<sup>1</sup>, Кокорина А.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>) Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия  
E-mail: [anas.kokorina2017@yandex.ru](mailto:anas.kokorina2017@yandex.ru)

## **QUANTUM TRANSMITTER ENGINEERING BASED ON TRANSITION METAL ADATOMS**

Kashin I.V.<sup>1</sup>, Kokorina A.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>) Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

We suggest a model of nanoscale quantum transmitter, based on isotropic exchange interactions between transition metal atoms on a surface. Under consideration is nanosystem of antiferromagnetically coupled dimers, forming a ferromagnetic conducting line. It was shown that spatially localized external magnetic influence (SLEMI) can serve as the binary signal to be sent through the line with no essential loss; as value of classical spin length increases, the signal value gradually goes to saturation.

Прогресс в области квантовых вычислений привлекает внимание исследователей к разработке новых фундаментальных и прикладных методов повышения скорости работы квантового компьютера [1-4]. На данный момент связь

между различными модулями разработана на базе классической физики или, по крайней мере, квазиклассической, однако для ее улучшения можно использовать квантовую передачу сигнала.

Целью данной работы явилось создание модели квантового передатчика сигнала, предназначенной для функционирования в нормальных магнитных полях при относительно низких температурах ( $\sim 10$  К) и исследование зависимости сигнала от модуля классического спина. Поскольку сигнал является результатом изотропных обменных взаимодействий между отдельными атомами переходного металла (ТМ), модель была записана в форме Гейзенберга и решена с помощью полной диагонализации.

Для теоретического исследования способности атомов переходного металла, адсорбированных на поверхности, передавать сигнал, мы предлагаем вполне определенную геометрию системы, которая может быть интерпретирована как модифицированная одномерная ферромагнитная спиновая цепочка. В рамках данной геометрии каждый спин наделяется другим соседним спином, связанным с ним антиферромагнитно (Рис. 1).

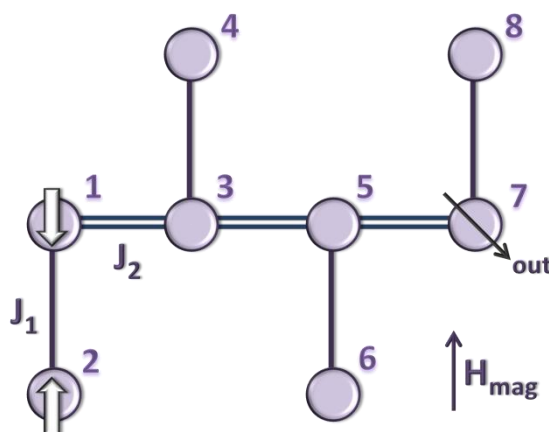


Рис. 1. Схематическое изображение рассматриваемой модели. Жирные стрелки показывают направление «классических» спинов. Одинарные и двойные линии обозначают обменную связь AFM ( $J_1$ ) и FM ( $J_2$ ) соответственно. Крайний правый спин базовой цепи FM помечен как «out»

SLEMI в модели осуществляется как допущение, что один из димеров является полностью классическим, в то время как пропускная способность оценивается как  $\langle \hat{S}_7^Z \rangle$ , где 7 – индекс последнего спина исходной ферромагнитной цепи. Тогда гамильтониан можно записать как:

$$\hat{H} = \sum_{p=1}^2 \sum_j J_{pj} \cdot \mathbf{K}_p \cdot \hat{\mathbf{S}}_j + \sum_{\langle i,j \rangle} J_{ij} \cdot \hat{\mathbf{S}}_i \cdot \hat{\mathbf{S}}_j - H_{mag} \cdot \sum_j \hat{S}_j^Z,$$

где  $\mathbf{K}_p$  – векторы «классических» спинов ( $p=1$  обозначает спин на исходной линии,  $p=2$  – его сосед в димере),  $|\mathbf{K}_p| = S_j = 1/2$ , и  $\mathbf{H}_{mag} = (0, 0, H_{mag})$  – внешнее магнитное поле. Заметим, что первый член в формуле может быть интерпретирован как специфический тип анизотропии одного узла, модулируемой величиной спина и обменным взаимодействием. Поскольку мы должны придать  $\mathbf{K}_p$  значение двоичного сигнала рассмотрим  $\mathbf{K}_1 = (0, 0, -1/2)$  и  $\mathbf{K}_2 = (0, 0, 1/2)$ , положим отрицательный знак  $\langle \hat{S}_7^Z \rangle$  как индикатор эффективности передачи. Проводя полную диагонализацию гамильтониана в матричном представлении,  $\langle \hat{S}_7^Z \rangle$  можно рассчитать как:

$$\langle \hat{S}_7^Z \rangle = \frac{1}{Z} \sum_n \langle \varphi_n | \hat{S}_7^Z | \varphi_n \rangle \cdot e^{-E_n/T}$$

где  $Z$  – статистическая сумма,  $|\varphi_n\rangle$  – собственное состояние гамильтониана,  $T$  – температура в энергетическом представлении.

В качестве первого шага нормализуем параметры модели, установив  $J_2 = -1$  отн.ед. Моделирование системы при низкой температуре ( $T = 0.02$  отн.ед.) выявил немонотонный характер  $\langle \hat{S}_7^Z \rangle$  как функции  $J_1$ .

Рассмотрим интенсивность пика  $\langle \hat{S}_7^Z \rangle$  как функцию длины классического спина (в качестве аргумента возьмем значение  $J_1$ , при котором наблюдается пиковая пропускная способность).

Видно, что при увеличении длины классического спина значение сигнала  $\langle \hat{S}_7^Z \rangle$ , постепенно увеличиваясь, выходит на насыщение. Если будем увеличивать число димеров в системе, то проводимость сигнала будет уменьшаться.

Нами была разработана модель квантового передатчика, способность распространять сигнал по димеризованной спиновой цепи без подавления внешним магнитным полем.

Наши расчеты продемонстрировали, что увеличение длины системы путем добавления димеров приводит к уменьшению пропускной способности. Предполагая 1 отн. и. равное 10 мЭВ приводит к оценке рабочей температуры в 5–10 К, что указывает на реальные перспективы совершенствования квантовых компьютеров с помощью нового типа связи.

1. J. D. Biamonte et al., Nature 573, 190–191 (2019)
2. G. J. Mooney et al., Sci. Rep. 9, 13465 (2019)
3. E. Grant et al., Npj Quantum Inf. 4, 65 (2018)
4. H. Ren and Y. Li, Phys. Rev. Lett. 123, 140405 (2019)